

行波光参量过程的理论与实验研究*

徐秀俐 徐 瑶 许祖彦

(中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

周寿桓 裴 博 章正宇

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要 通过对行波光参量三波耦合过程时域特性的理论计算, 预示了光参量时域过程可能存在“弛豫”振荡, 理论与实验相结合分析了抽运光强度、晶体长度、腔长、输出耦合系数等一系列参数对参量输出的影响, 并采用一种新的棱镜环形腔进行实验, 得到了从 $0.41 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 的连续宽调谐输出和22%的能量转换效率。

关键词 行波, 光参量振荡, 环形腔。

1 引 言

激光光参量振荡是 Giordmaine 和 Miller 在1965年发现的^[1]。光参量振荡器主要采用驻波腔型构成谐振腔, 例如线性腔和复合腔^[2]等。本文对一种独特的行波腔光参量过程^[3, 4]进行理论分析和实验验证。这里行波腔的主要特点是光在其中只沿一个方向传播, 而不是象驻波腔那样光在其中是来回振荡的。

行波腔相对于驻波腔有以下优点: 1) 在驻波腔中光来回振荡传播, 而晶体只对一个方向满足相位匹配, 这就意味着驻波腔的有效腔长要比行波腔长。而在其它参数相同的情况下, 腔长过大会导致效率下降。2) 驻波腔中来回振荡的光很容易被反馈到抽运光源里, 从而干扰甚至损坏抽运光源, 而在行波腔中则不存在这个问题。

本文所研究的棱镜环形腔具有抗损伤阈值高、简单易行、结构紧凑等特点, 在开发高功率、高效率、宽调谐的参量激光器件方面有很好的应用前景。

2 行波光参量过程理论模型

光参量过程中, 一个频率为 ω_p 的抽运光光子, 通过介质的非线性响应, 转化为一个频率为 ω_s 的信号光光子和一个频率为 ω_i 的闲频光光子。在此过程中, 这三种频率的光子满足能量守恒关系:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i. \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(4-110112)资助项目。

收稿日期: 1998-11-02; 收到修改稿日期: 1999-01-06

不考虑介质的吸收, 三光子在非线性介质中的相互作用耦合波方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_1(z)}{\partial z} + \frac{1}{u_1} \frac{\partial E_1}{\partial t} &= iB_1 E_2^* E_3 \exp(-i\Delta kz), \\ \frac{\partial E_2(z)}{\partial z} + \frac{1}{u_2} \frac{\partial E_2}{\partial t} &= iB_2 E_1^* E_3 \exp(-i\Delta kz), \\ \frac{\partial E_3(z)}{\partial z} + \frac{1}{u_3} \frac{\partial E_3}{\partial t} &= iB_3 E_1 E_2 \exp(-i\Delta kz), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $B_i = \omega d_{\text{eff}}/(n_i c)$ ($i = 1, 2, 3$ 分别表示 s, i, p 光, n_i 表示三光波在晶体中的折射率)。 $\Delta kz = [k_3 - (k_1 + k_2)]z$ 是三波之间的相位差, k_i 为各光波的波矢。 $u_i = [\partial k(\omega)/\partial(\omega)]^{-1}$ ($i = 1, 2, 3$) 表示介质中的群速度。

对于长脉冲及连续波运转, 由于其谱宽度相对较窄, 群速色散效应也较小, 在理论计算时往往不考虑群速色散项。同时忽略晶体吸收、光束走离效应及光路衍射损耗等影响, 在满足相位匹配条件下, (2) 式所表示的方程可简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_1(z)}{\partial z} &= iB_1 E_2^* E_3, \\ \frac{\partial E_2(z)}{\partial z} &= iB_2 E_1^* E_3, \\ \frac{\partial E_3(z)}{\partial z} &= iB_3 E_1 E_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

设 $E_1(z) = A_1(z) + iB_1(z)$, $E_2(z) = A_2(z) + iB_2(z)$, $E_3(z) = A_3(z) + iB_3(z)$, (4) 将(3)式复振幅按实部、虚部分开, 则得到

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_1(z)}{dz} &= \frac{\omega_1 d_{\text{eff}}}{(n_1 c)} (B_2 A_3 - A_2 B_3), \\ \frac{dB_1(z)}{dz} &= \frac{\omega_1 d_{\text{eff}}}{(n_1 c)} (A_2 A_3 + B_2 B_3), \\ \frac{dA_2(z)}{dz} &= \frac{\omega_2 d_{\text{eff}}}{(n_2 c)} (B_1 A_3 - A_1 B_3), \\ \frac{dB_2(z)}{dz} &= \frac{\omega_2 d_{\text{eff}}}{(n_2 c)} (A_1 A_3 + B_1 B_3), \\ \frac{dA_3(z)}{dz} &= -\frac{\omega_3 d_{\text{eff}}}{(n_3 c)} (A_1 B_2 + A_2 B_1), \\ \frac{dB_3(z)}{dz} &= \frac{\omega_3 d_{\text{eff}}}{(n_3 c)} (A_1 A_2 - B_1 B_2). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

可采用四阶龙格-库塔法数值求解此微分方程组。

在计算过程中, 假定抽运光脉冲的初始波形为高斯波形, 并且只考虑与时间有关的项, 而忽略空间光强分布的变化, 则有

$$A_p(t) = A_{p0} \exp[-2 \ln 2(t - t_0)^2/\tau_p^2], \quad (6)$$

τ_p 表示脉冲宽度。

在抽运光进入非线性晶体之前, 腔内只有噪声信号。当 ω_p 光进入晶体, 与晶体发生非线性作用以后, 在晶体里发生频率变换效应, 产生 ω_s 光和 ω_i 光。随着光波在晶体里向前传播, ω_p 光慢慢被消耗, ω_s 光与 ω_i 光同时增强, 当三光波达到输出耦合镜时, 大部分的抽运光透过

输出镜到达腔外,而部分的信号光或闲频光返回腔内继续参加下一次非线性过程。

对于长脉冲抽运,即抽运光的脉宽 τ_p 远长于光在腔内走一圈所用的时间,返回腔内的信号光、闲频光可与同一个抽运光脉冲多次发生非线性相互作用,从而得到较强较稳定的输出。

在数值运算中,高斯波形的抽运光脉冲被分成等间隔的多个等分,每一个等分的时间即是信号光波在腔内走一圈所用的时间。同时,晶体也被分成长度为 dz 的数个等分,每一等分对应于龙格-库塔法中的步长 h 。

3 实验光路

本工作采用一种新颖的由棱镜等组成的环形腔进行实验,光路图如图1所示。

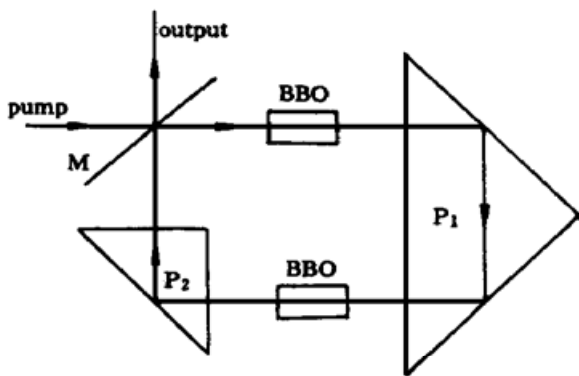


Fig. 1 Prism-based uncoating travelling-wave OPO cavity. P₁, P₂: prism, M: uncoating mirror

图中 M 是普通石英光学镜片,未镀膜, P₁、P₂ 分别是直角石英棱镜。两块 BBO 晶体,每块尺寸为 8 mm × 6 mm × 15 mm,采用 I 类相位匹配。抽运光采用调 Q Nd:YAG 激光的三次谐波,波长为 355 nm,脉宽约为 10 ns。

为使输出镜 M 对信号光的反射率尽可能大,采用 P 偏振的抽运光。满足 I 类相位匹配,可得 S 偏振的参量光。此时 M 镜对参量光在 45°角入射时的反射率约为 12%。这样的光路,带宽仅取决于材料的透过谱,透过波段范围可达紫外到红外。

4 理论与实验结果分析

4.1 行波光参量时域特性

图 2(a)、图 2(b)、图 2(c) 分别表示抽运光强度分别为 110 MW/cm²、140 MW/cm²、170 MW/cm²、腔长为 160 mm、晶体长度为 15 mm × 2、输出耦合系数为 90% 时得到的行波光参量时域曲线。可以看出,当抽运光逐渐增强时,抽运光脉冲消耗以及参量光输出并不表现为单一的平滑光脉冲,而是表现为一系列“尖峰”脉冲,且“尖峰”之间的时间间隔随抽运光

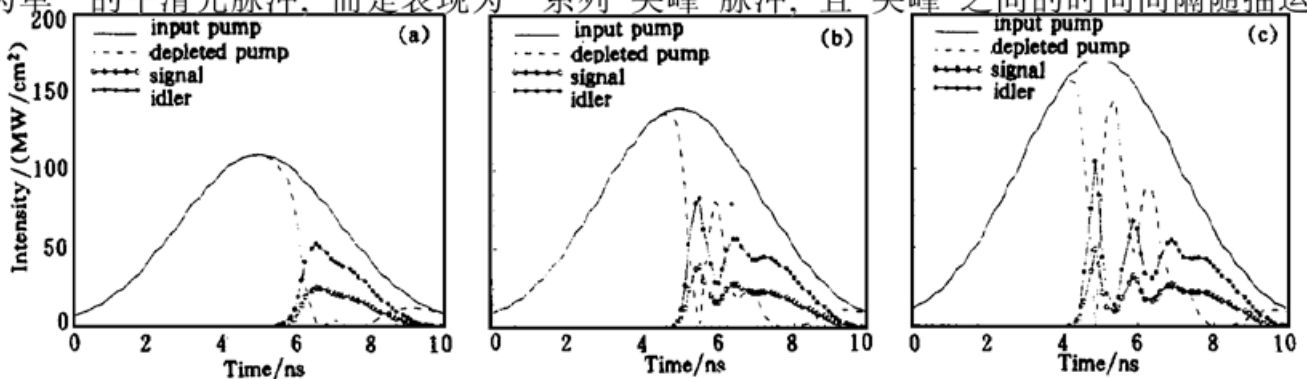


Fig. 2 Travelling-wave OPO time-dependent profiles. cavity length: 160 mm, BBO crystal: 15 mm × 2, output coupling coefficient 90%. pump intensity: (a) 110 MW/cm²; (b) 140 MW/cm²; (c) 170 MW/cm²

强度及其它参数的改变而不同, 这种“尖峰”振荡效应与经典激光振荡中的“弛豫”振荡效应很类似。

与激光振荡类似, 光参量振荡的产生也存在一个阈值, 只有当抽运光功率达到或超过这个阈值时才会有参量光输出。图 2 中对应于被消耗抽运光脉冲第一个尖峰的时间 t_b 叫做“建立时间”, 它表示抽运光脉冲从这一时刻开始达到了阈值, 参量振荡从这个时刻开始产生。

在参量注入放大器中, 建立时间对效率影响较大, 太长的建立时间会限制放大倍数。因此可以在抽运光与信号光之间制造一个延时, 信号光提前进入晶体, 使得系统内 ω_s 光子浓度有一个初值, 从而在一定程度上降低了阈值, 充分利用抽运光脉冲能量以获得最好的放大效果。图 3 即给出了抽运光强度为 110 MW/cm^2 、信号光初始强度为 10^{-2} W/cm^2 、晶体长度为 $15 \text{ mm} \times 2$ 时的最佳延时。图中 $t_s - t_p$ 表示信号光和抽运光之间的时间差, 负号即信号光在前, 最佳延时量为 3 ns 。

4.2 调谐特性

在抽运光强度为 110 MW/cm^2 、腔长为 160 mm 、晶体长度为 $15 \text{ mm} \times 2$ 、输出耦合系数为 90% 的条件下得到的调谐特性的理论和实验结果示于图 4。从图中可以看出此行波光参量腔调谐范围约为 $0.41 \sim 2.4 \mu\text{m}$, 能量转换效率达 22% 。

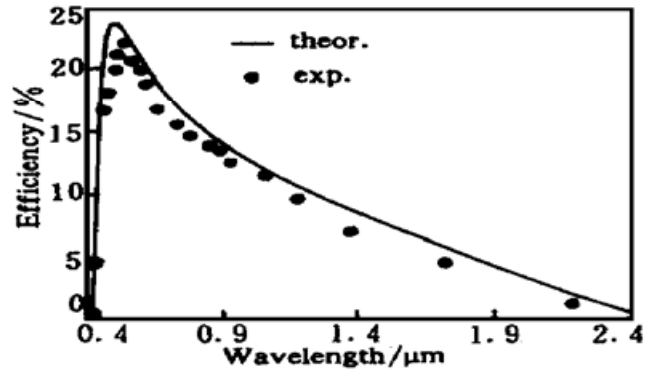
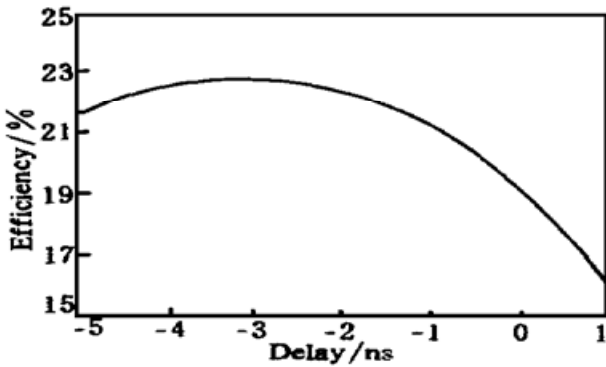


Fig. 3 Time delay ($t_s - t_p$) between pump and signal in OPA: pump: 110 MW/cm^2 , signal: 10^{-2} W/cm^2 , BBO crystal: $15 \text{ mm} \times 2$

Fig. 4 Tuning range of travelling-wave OPO: pump: 110 MW/cm^2 , cavity length: 160 mm , BBO crystal: $15 \text{ mm} \times 2$

4.3 抽运光强度与输出效率

光参量过程中, 抽运光强度能够直接决定参量输出大小, 但在其它参数确定的情况下, 抽运光强度并不是越高越好。在晶体损伤阈值范围内, 抽运光强度存在一个最佳值, 超过这个值, 腔内会发生强的逆过程, 它将抑制正过程的发生, 从而导致参量输出效率下降。

所谓逆过程与参量正过程相反, 即一个 ω_s 光子与一个 ω_p 光子和频产生一个 ω_s 光子的过程。在整个参量过程中正、逆过程同时存在, 互相抑制。过程初期, 正过程占主导地位, 对应于 ω_s 、 ω_s 的光子数不断增加, 光子密度不断增大, 而 ω_p 光子密度逐渐减少。当晶体有效长度足够长时, 随着参量过程的逐步进行, 一段时间后三种光子密度的平衡态将被打破而使得逆过程占主导地位。逆过程加强又会导致 ω_p 光子密度不断增加和 ω_s 、 ω_s 光子密度相应减少, 从而抑制逆过程本身, 而有利于正过程进行。

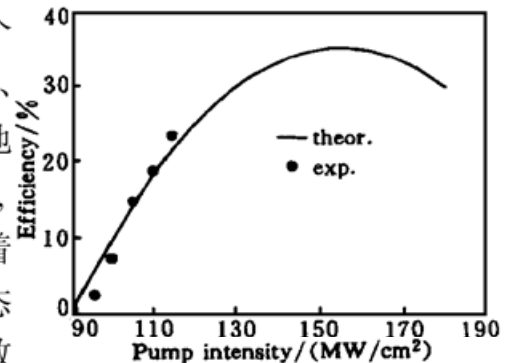


Fig. 5 Conversion efficiency vs. pump intensity

图 5 给出腔长为 160 mm、晶体长度为 15 mm×2、输出耦合系数为 90% 的条件下得到的 0.53 μm 参量光输出。从图可以看出抽运光强度为 160 MW/cm² 时效率最高。实验所采用的最强抽运光强度为 110 MW/cm²。

4.4 晶体长度与输出曲线

图 6 给出两组结果, 分别是在抽运光强度为 110 MW/cm² 和 150 MW/cm²、腔长为 160 mm、输出耦合系数为 90% 的条件下得到的。可以看出, 对每种条件都存在一个最佳晶体长度。图中圆圈表示抽运光强度为 110 MW/cm²、晶体长度为 15 mm×2 时的实验结果。

4.5 输出耦合系数与输出曲线

参量过程对腔镜的耦合系数很敏感, 因此合适的腔镜设计将有利于得到最佳输出。

图 7 给出抽运光强度为 110 MW/cm²、腔长为 160 mm、晶体长度为 15 mm×2 和抽运光强度为 150 MW/cm² 而其它参数不变的两种条件下得到的计算结果。可以看出, 在其它参数确定的情况下, 存在一个最佳输出耦合系数。图中圆圈表示抽运光强度为 110 MW/cm²、输出耦合系数为 90% 时所得到的实验结果。

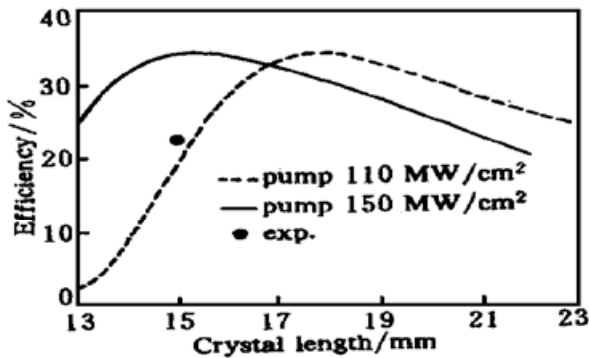


Fig. 6 Conversion efficiency vs. crystal length

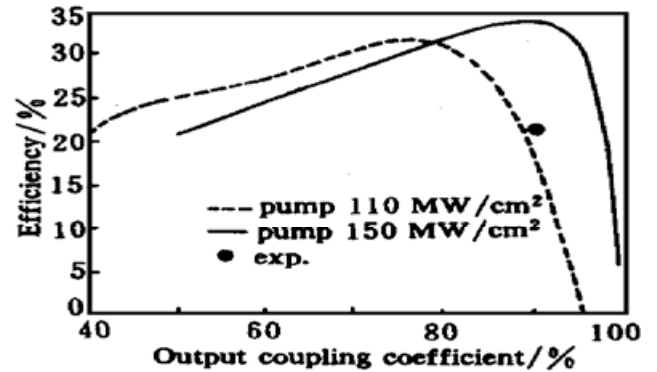


Fig. 7 Conversion efficiency vs. output coupling coefficient

结 论 通过理论计算, 得到了行波光参量过程的时域特性和输出特性, 理论预示了参量过程可能会出现“弛豫”振荡, 参量正过程与逆过程的相互制约导致了最佳输出条件的存在。

采取理论与实验相结合, 对抽运光强度、延时、晶体长度、输出耦合系数等参数的影响进行了分析, 证明了这些参数都存在一个最佳值, 只有合理地进行匹配才能得到光参量激光器的优化运转。

采用一种新的棱镜环形腔进行了初步的实验, 得到了约为 0.41~ 2.4 μm 的连续宽调谐输出和 22% 的能量转换效率。这种环形腔弥补了线性腔利用一个输出耦合镜难以实现紫外到红外宽调谐的不足, 并具有抗损伤阈值高、调谐范围宽、结构紧凑、简单易行等特点, 在开发高功率、高效率、宽调谐的参量激光器件方面有很好的应用前景。

本文工作得到了中国科学院物理研究所 L04 组全体工作人员的支持和帮助, 在此表示感谢, 同时感谢王进雄工程师为实验提供了性能良好的 YAG 激光光源。

参 考 文 献

- [1] Giordmaine J A, Miller R C. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO₃ at optical frequencies. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14**(24): 973~ 976
- [2] Zhou Yi, Xu Zuyan, Deng Daoqun *et al.*. Optical parametric system with a compound cavity and a

- grazing-incidence prism. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **14**(6) : 1496~ 1500
- [3] Fix A, Wallenstein R. Spectral properties of pulsed nanosecond optical parametric oscillators: Experimental investigation and numerical analysis. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1996, **13**(11) : 2484~ 2497
- [4] Smith A V, Alford W J, Raymond T D *et al.*. Comparison of a numerical model with measured performance of a seeded, nanosecond KTP optical parametric oscillator. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(11) : 2253~ 2267
- [5] 许祖彦. 光参量激光器. 中国激光, 1994, **A21**(5) : 329~ 333

Theoretical and Experimental Research of Travelling-Wave Optical Parametric Oscillation

Xu Xiuli Xu Yao Xu Zuyan

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Zhou Shouhuan Pei Bo Zhang Zhengyu

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015)

(Received 2 November 1998; revised 6 January 1999)

Abstract Time-dependent characters of the three-photon-coupling process of OPO has been calculated and the effects of a series of parameters such as pump intensity, time delay, crystal length, cavity length and output coupling coefficient have been analyzed. Calculation results presaged the existence of “relaxing oscillation” in travelling-wave OPO. By using a new kind of uncoated ring cavity, the tuning range from 0.41 μm to 2.4 μm and energy conversion efficiency of 22% have been obtained experimentally. The consistency between theory and experiments is demonstrated.

Key words travelling-wave, optical parametric oscillation, ring cavity.